

洞室工程地震 CT 与 VSP 联合检测方法及应用实例

刘永华¹, 田宗勇², 赵淑红¹, 王玉贵¹, 黄小军²

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 水利部 长江勘测技术研究所, 湖北 武汉 430011)

[摘要] 地震层析成像(CT)和垂直地震剖面(VSP)法一直作为两种完全分离的探测技术在勘探活动中运用,而洞室工程地震CT与VSP联合检测方法则是充分利用VSP和CT数据采集方式的兼容性,通过一体化观测系统参数设计和优化数据处理流程,将两种地震勘探手段融为一体而成为优化组合技术下的高分辨工程物探方法。方法实验结果表明,地震CT与VSP联合检测方法在近地表岩土工程勘查应用中几乎可以不增加野外工作费用,就能够同时获取地下洞室工程体施测区间内的地震CT数据和关于洞室轴向剖面方向的逆向VSP数据体。

[关键词] 洞室工程检测; VSP; CT; 一体化观测系统; 初始速度模型; 联合成像; 三峡大坝

[中图分类号] P631.4; TV651.3 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)03-0055-04

[作者简介] 刘永华(1955-),男,陕西镇巴人,副研究员,从事地震勘探教学与新方法应用技术研究。

1 洞室观测系统

有关CT和VSP方法技术原理,文献[1~6]已有比较详细地论述。具体方法是在工程VSP与CT数据采集一体化观测前,应认真做好有关施工方案、仪器设备测试、观测系统设计等方面的准备工作。其主要内容应包括:收集待测洞室工程的相关资料,如地下洞室工程地质断面、洞体结构及主要控制点坐标等。此外,还需要了解施工场地及邻近地段内的干扰波源与环境噪音情况,以便为施工组织 and 确定作业方案提供参考和依据。洞室工程VSP与CT联合探测方法施工观测系统的一般描述见图1。图1比较实用且值得推荐的一种联合采集方法是:

(1)洞室1震源排列C逐点激发,洞室2观测排列D及主洞室(或地面)观测排列A接收。

(2)洞室2震源排列D逐点激发,洞室1观测排列C及主洞室(或地面)观测排列B接收。

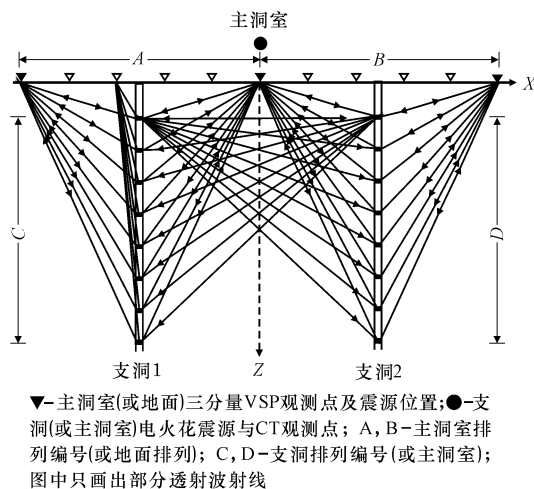


图1 洞室工程地震CT和VSP
数据采集一体化观测系统

Fig. 1 Recording geometry chart of cave engineering seismic CT and VSP data

在勘测实践中,亦可只实施上述双向采集方案之一。按照井地双重观测系统实施数据采集,在获取1~2洞室间CT数据的同时,几乎不增加野外工作费用便可得到施测孔的多偏移距洞室VSP数据体。因洞室多炮点震源激发情况下,VSP接收排列各观测点的地震记录可构成若干个固定偏移距逆向VSP道集。道选排后又可组成关于洞室震源排列各

炮点的变偏移距逆向 VSP 道集。洞室地震波测量可使用锤击震源或小药量爆炸震源方式。地震 CT 数据采集可使用单分量速度或加速度检波器⁷，VSP 数据采集最好使用自然频率参数相近且类型一致的专用三分量检波器。此外，地震仪最小采样率要求可达到 50 μ s，通道数一般应 \geq 24 道，若能够配备 48 通道高分辨地震仪最好。需要注意在洞室环境资料采集中使用三分量检波器时，各个分量的指向在接收排列上应保持一致，垂直或水平震源力的激震方向应与三分量检波器各分量的指向关系相协调。

2 联合反演数据分析处理流程

工程 VSP 与地震 CT 联合反演的主要技术思路,实质上就是依托 VSP 剖面解译成果(界面埋深、层厚度及界面倾角等),建立贴近于工程地质真实情况的初始 CT 速度模型,并利用 VSP 速度参数信息作为 CT 速度成像已知边界与约束条件。

在联合反演之前,精细“初至拾取”是层速度成像处理中最重要的基础环节,应根据采集资料的特点及原始记录质量采用不同的拾取方法,例如极值法或相关法。对于选定的拾取方法,将视初至波能量和波形特征是否受到干扰、以及地表一致性问题等因素的影响程度等,则需要考虑用于初至拾取的记录剖面是否进行滤波处理,如使用地表一致性校正或整形反褶积手段以改善其记录面貌。类似问题及其处理方法和工艺还有若干,工程 VSP 与地震 CT 数据分析和联合速度成像处理的参考流程见图 2。

3 三峡大坝 NB6 排水洞工程应用实例

三峡大坝永久舱闸分上下引航道和闸室段, NB6 排水洞位于左线闸室北边坡中部。边坡岩体为闪方斜长花岗岩,岩石较坚硬且完整。船闸区主要断裂及岩脉等结构面依次划分为北北西、北北东、东北和近东西向 4 组。因闸室开挖后已形成 100~130 m 的高边坡,受岩体地应力释放、卸荷及应力重新分布等多种原因,岩体将有可能发生变形甚至于影响到高边坡工程稳定性。为配合工程地质分析和研究工作,先后对 NB6 主洞室及其支洞 NB64, NB65 所围区间的岩体进行工程 VSP 与透射 CT 测试,现场施工平面位置如图 3。VSP 与 CT 联合采集时以 NB6 主洞室为锤击震源排列(炮

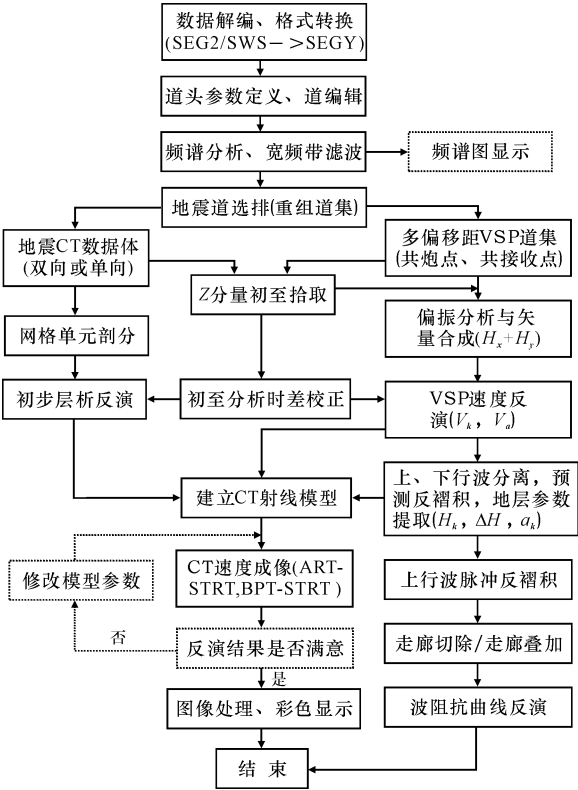


图 2 地震 CT 与工程 VSP 数据处理参考流程

Fig. 2 Seismic CT and engineering VSP data processing reference flow

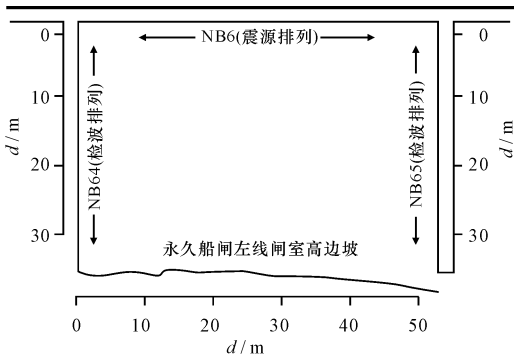
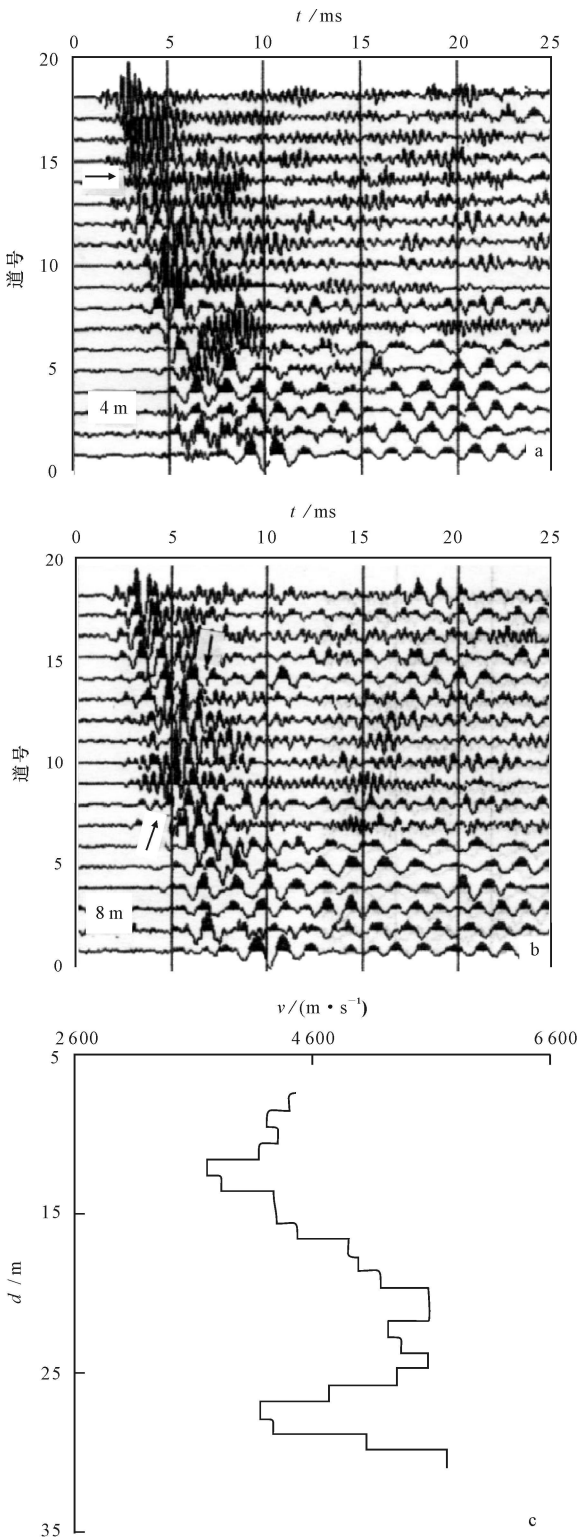


图 3 NB6 排水洞及其边坡位置

Fig. 3 Chart of NB6 drainage cave and its side site

点距 2 m), 检波器排列分别布置于 NB64, NB65 支洞中(道间距 1.0 m, 采样率 50 μ s)。

图 4 是以 NB6 主洞室为炮点排列、NB64 支洞为接收排列时的纵波采集资料。由两个偏移距记录剖面图可见透射波初至能量特征比较清晰,在 4 m 偏移距道集剖面上高频谐振较突出,位于第 6~15 道的上行反射波同相轴依稀可辨。当炮点偏移距增大为 8 m 时,高频干扰能量被明显削弱,对应于第 7 道、即起始于支洞 NB64 轴向剖面 27 m 处的上行反射波能量进一步得到加强,但频率成分有



a - 偏移距 4 m; b - 偏移距 8 m; c - 偏移距 2 m 时的 VSP 层速度曲线; 观测段: 34 ~ 7 m; 道间距: 2 m

图 4 三峡大坝 NB64 支洞 VSP 原始记录显示和洞室 VSP 层速度曲线

ig. 4 VSP original record of the Three Gorges dam on the Yangtze River NB64 cave and cave VSP layer velocity curve

所降低。其位置由于该弹性界面与 NB6 主洞室指向大体平行, 因此, 其反射地震响应实质上与花岗岩体内部的垂直裂隙带或节理面有关。出现在第 3 ~ 5 道的低频波, 与洞室外侧的边坡临空面有关。

NB6 泄洪平洞工程 VSP 和 CT 联合反演结果见图 5。在该层速度剖面图中, 可见到两个具有相对规模的低速异常带。其中, I 号低速异常带起始于支洞 NB65 深 7.8 m 处, 大致呈南西方向终止于高边坡北侧(对应于桩号 8.0 m 附近)。结合工程地质资料和 VSP 剖面反射波信息及层速度曲线特征(图 4), 推断该低速异常为岩体内部隐伏小断层或裂隙带的地震响应。II 号低速异常带与主洞室近似平行, 由支洞 NB65 深 26.5 m 处起始, 呈近东西方向终止在支洞 NB64 深 30 m 处。根据该异常带展出部位和形态特征, 很可能是 F₂₂ 和 F₂₃ 已知断层共同作用的结果。而位于边坡 5 ~ 12 m 处的局部低速异常, 推测为 F₁₉ 断层及高边坡喷浆面与基岩体未能良好固结所形成的低速效应。据 NB6 洞室 VSP 与 CT 层速度资料分析统计, 三峡大坝闪方斜长花岗岩体的纵波层速度变化范围为 3 500 ~ 6 500 m · s⁻¹, 速度比 v_p/v_s 一般在 1.65 ~ 1.8^[8, 9]。

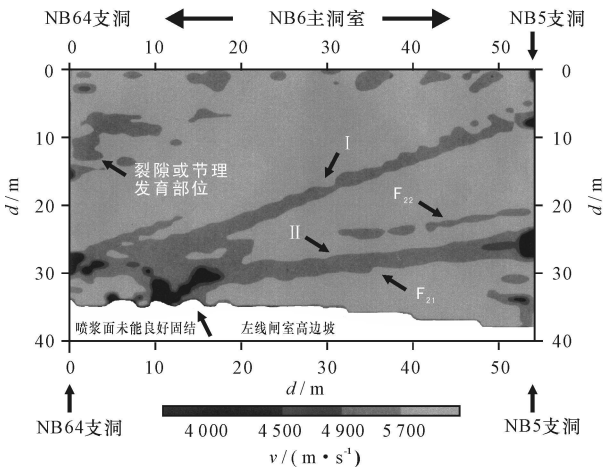


图 5 三峡大坝永久船闸 NB6 排水洞地震 CT 与 VSP 联合反演层速度剖面

Fig. 5 Inversion layer velocity profile of combined method of VSP and CT in the three gorges dam on the Yangtze Rier forever ship NB64 drainage

将联合反演层速度剖面图同 VSP 层速度曲线相对比, 两种速度成果虽具有其共同的特点但也存在着明显的差异性。NB64 支洞 VSP 速度曲线的低速异常与联合反演结果具有较好的对应关系, 说明这一低速带不仅在横向存在(支洞之间), 并且在

纵向上亦有异常显示。然而 NB65 支洞 VSP 层速度异常不仅和联合反演结果之间有明显差异,其层速度曲线特征与 NB64 支洞 VSP 速度曲线的对应关系也不尽一致。

4 结语

(1)地震 CT 和工程 VSP 2 种高分辨地震方法,完全能够融为一体而成为近地表工程地质精细探测所需要的联合探测技术。充分利用地震 CT 和 VSP 数据采集方式的兼容性和科学设计观测系统参数,几乎可以做到不增加现场工作费,就可同时获取洞室工程地质体地震 CT 数据和逆向 VSP 数据体。

(2)在地下洞室工程体内部(如各类大中型隧道或隧洞工程),地震 CT 和工程 VSP 方法技术相结合,最具有进行围岩精细分类、岩体内部完整性检测、洞室工程稳定性评价等地质工程技术应用前景和优势方法技术基础。特别是有关洞室工程体旁侧(径向)和掘进前方(轴向)复杂构造现象及病害地质体超前预测及岩土层物性和弹性力学性质分析估算等方面,几乎是其他物探方法不能替代的精细探测技术组合^[10, 11]。

(3)对于高分辨工程地质检测目标而言,隐蔽于块状岩体内部或深处的地质病害隐患表现在透射波初至时间上的差异并不十分明显。因此,仅仅

依赖于透射波旅行时反演提取其速度参数是远远不够的。

[参 考 文 献]

- [1] Nolet 主编.地震层析技术[M]. 冯锐,郝景琦,译.北京:地质出版社,1991.
- [2] 赫尔曼 G T, 图伊 H K, 兰振伯格 K J, 等.层析成像和反演问题的基本方法[M]. 黄联捷,李幼铭译.北京:石油工业出版社,1997.
- [3] 杨文采.工程地球物理反演的理论与方法[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [4] 朱光明.垂直地震剖面方法[M]. 北京:石油工业出版社,1988.
- [5] 谢明道.垂直地震剖面应用技术[M]. 北京:石油工业出版社,1991.
- [6] 傅淑芳,朱益仁.地球物理反演问题[M]. 北京:地震出版社,1998.
- [7] 冯锐,楼家丁.层析技术在水电工程中的应用[A]. 中国固体地球物理学进展[C]. 北京:海洋出版社,1999.
- [8] 张双喜,刘永华,李江凤.工程 VSP 技术在三峡坝区中的应用[J]. 地球物理学报,1996, 39(增刊): 316~325.
- [9] 田宗勇,刘永华.工程 VSP 和井间 CT 技术联合反演方法的研究[R]. 北京:水利部科技开发项目 SJ9609 研究报告,2000.
- [10] 刘永华,田宗勇,喻振华,等.工程 VSP 与地震 CT 联合探测方法及其在岩土工程的应用[J]. 地球物理学进展,2005, 20(1): 267~272.
- [11] 杨正华,朱光明,杜有成,等.井地联合地震勘探在陕北油田开发中的应用[J]. 地球科学与环境学报,2004, 26(1): 65~68.

Methods and applications of joint detection with cavity engineering seismic CT and VSP

LIU Yong hua¹, TIAN Zong yong², ZHAO Shu hong¹, WANG Yu gui¹, HUANG Xiao jun²

(1. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Yangtze River Institute of Exploration and Survey, Ministry of Water Resources, Wuhan 430011, China)

Abstract Up to now, the Seismic Computerized Tomography(CT) method and Vertical Seismic Profile(VSP) method are two completely separated detection method used in exploration, but “the method of joint detection with cavity engineering seismic CT and VSP” may demonstrate the compatibility of VSP and CT data. Designing the process flow according to the integral layout parameters these two methods can be fused as one with high resolution adopting the strategy above with practical examples, the seismic CT dataset of the subsurface cavity and reverse VSP dataset can be got in the axial profile direction of the cave at the same time, and the exploration cost can not be increased. The datasets such as multi offset reverse VSP gather can be developed at each receiving station and walk away reverse VSP gather at each shot station.

Key words cavity engineering detection; VSP; CT; unified recording geometry; initial velocity model; joint image; Three Gorges dam

[英文审定:李庆春]